

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECANICO DE MEZCLAS
ASFALTICAS MODIFICADAS CON LLENANTE MINERAL DE CENIZA
DE LA CASCARILLA RESULTANTE DE LA MOLIENDA DEL ARROZ**

**OMAR FELIPE LIZCANO GARZON
DEYBER ANDRES RAMOS FELIX**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTA
2020**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLAS ASFALTICAS
MODIFICADAS CON LLENANTE MINERAL DE CENIZA DE LA CASCARILLA
RESULTANTE DE LA MOLIENDA DEL ARROZ**

**OMAR FELIPE LIZCANO GARZON
DEYBER ANDRES RAMOS FELIX**

**Trabajo de grado para optar al título de
Especialista en Ingeniería de Pavimentos**

**Director de la Especialización
JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACION DE INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTA
2020**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciantes (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Director de Investigación

Asesor Metodológico

Jurado

Bogotá D.C., Miércoles 13 de Mayo del 2020

AGRADECIMIENTOS

A Dios: agradecimientos por permitirnos culminar las asignaturas y estudios de la especialización en ingeniería de pavimentos así mismo a los docentes y directivos de la Universidad Católica de Colombia, así como a nuestras familias por su invaluable dedicación, paciencia y cooperación a lo largo del tiempo que nos fue destinado para alcanzar este logro.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	16
1.1. LINEA DE INVESTIGACION	16
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	16
1.3. JUSTIFICACION	19
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
2. MARCOS DE REFERENCIA	22
2.1. MARCO CONCEPTUAL	22
2.1.2. MATERIAL LIGNOCELULOSICO	27
2.1.3. FORMA DE UTILIZACION DEL MATERIAL LIGNOCELULOSICO COMO MODIFICADOR	28
2.2. MARCO TEORICO	29
2.3. MARCO LEGAL	31
3. METODOLOGIA	32
3.1. PROCEDIMIENTO INICIAL	32
3.2. TIPOS DE MEZCLAS A EVALUAR	34
3.2.1. TIPO DE MEZCLA #1	34
3.2.2. TIPO DE MEZCLA #2	34
3.2.3. TIPO DE MEZCLA #3	34
3.3. ENSAYO DEL METODO MARSHALL	35
3.4. ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (SECO)	36
3.5. ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE	37
4. RESULTADOS	39
4.1. ENSAYO MARSHALL	39
4.1.1. RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO MARSHALL (ESTABILIDAD)	39
4.1.2. RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO MARSHALL (FLUJO)	40
4.1.2. PARAMETRO DE RIGIDEZ MARSHALL (E/F)	41
4.2. ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA EN SECO	42
4.2.1. RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA	42
4.3. ENSAYO DE CANTABRO PERDIDA POR DESGASTE	43

4.3.1.	BRIQUETAS TIPO MDC-19	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2.	BRIQUETAS MODIFICADAS AL 50%.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3.	BRIQUETAS MODIFICADAS AL 100%	¡Error! Marcador no definido.
4.3.4	RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO DE CANTABRO	43
5.	ANALISIS ECONOMICO	44
5.1.	COSTOS MEZCLA TIPO 1 MDC-19	45
5.2.	COSTOS MEZCLA TIPO 2 LLENANTE MINERAL MODIFICADO 50%.....	45
5.3.	COSTOS MEZCLA TIPO 3 LLENANTE MINERAL MODIFICADO 100%.....	46
6.	CONCLUSIONES.....	47
8.	BIBLIOGRAFIA.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Pesaje de la cascarilla resultante de la molienda del arroz	32
Figura 2 Incineración de la cascarilla de arroz para obtención de la ceniza	32
Figura 3 Briquetas elaboradas para ensayos en el laboratorio.....	33
Figura 4 Compactación de las briquetas	34
Figura 5 Ejecución del ensayo Marshall: (a) Determinación de la masa seca; (b) Maquina de ensayo Marshall; (c) Inmersión de la briqueta antes del ensayo Marshall.....	35
Figura 6 Ejecución del ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	36
Figura 7 Ensayo Cántabro (a)Maquina de los ángeles, (b) Masa inicial, (c) Masa final.....	37
Figura 8 Briquetas sometidas al ensayo.....	38
Figura 9 Resultados ensayo Marshall (estabilidad promedio)	39
Figura 10 Resultados promedio ensayo Marshall (flujo)	40
Figura 11 Resultados de rigidez Marshall	41
Figura 12 Resultados promedio ensayo de tracción indirecta	42
Figura 13 Resultados promedio ensayo cántabro.....	43
Figura 14 Resultados obtenidos del ensayo Marshall mezcla tipo MDC-19.....	48
Figura 15 Resultados ensayo Marshall mezcla modificada al 50%	49
Figura 16 Resultados ensayo Marshall mezcla modificada al 100%	50
Figura 17 Resultados ensayo de tracción indirecta	51
Figura 18 Resultados de ensayo cántabro mezcla tipo MDC-19	52
Figura 19 Resultados de ensayo cántabro mezcla modificada al 50%	53
Figura 20 Resultados de ensayo cántabro mezcla modificada al 100%	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.....	33
Tabla 2 Configuración porcentaje de agregados de mezclas estudiadas.....	44
Tabla 3 Costos unitarios de la materia prima	44
Tabla 4 Costos tipo de mezcla 1 (MDC-19)	45
Tabla 5 Costos tipo de mezcla modificada al 50%	45
Tabla 6 Costos tipo de mezcla modificada al 100%	46
Tabla 7 Conclusión de resultados.....	47

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS Y UNIDADES DE MEDIDA

-) CA Cemento asfáltico de penetración 60-70 décimas de milímetro.
-) MDC Mezcla densa en caliente
-) INVIAS: (Instituto Nacional de Vías)
-) IDU: (Instituto de Desarrollo Urbano)
-) AASHTO: (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)
-) IDEAM: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)
-) KN Kilo Newton
-) KPa Kilo Pascales
-) PSI Libra por pulgada cuadrada
-) C Grado Celsius
-) Llenante Mineral de Material Lignocelulósico a base del residuo de la molienda del arroz
-) g Gama del material
-) Pi
-) Ton Toneladas
-) Mm milímetro
-) g Gramo
-) min – Max mínimo – máximo
-) Vv Volumen de vacíos
-) Cm³ Centímetro cubico

RESUMEN

La relación entre el desarrollo social y económico es directamente proporcional a la densidad y calidad de la red vial, es por esto que se requieren implementar soluciones técnicas que acompañadas con responsabilidad ambiental nos lleven al mejoramiento de nuestro país. En Colombia son destinadas 500.000 hectáreas para el cultivo de arroz en 215 municipios ubicados en los llanos orientales, Tolima, Huila, Santanderes y algo en los departamentos de la costa Norte como Magdalena, Córdoba, Sucre y cesar, la producción anual de arroz corresponde a 1.7 millones de toneladas anuales de las cuales el 18% la constituyen desechos (cascarilla) obtenidos después del trillado.

Es por ello que en el presente informe se realiza la caracterización mecánica de tres tipos de mezcla asfáltica cuyo llenante mineral es reemplazado por diferentes concentraciones de ceniza de cascarilla de arroz con el fin de determinar si dichas mezclas cumplen parámetros técnicos analizándolas con los métodos ensayos: Marshall de flujo y estabilidad (I.N.V. E-748-07), Tracción indirecta (I.N.V. E-725-07) y Cántabro (I.N.V. E-760-07), dichas mezclas son realizadas con la gradación de una mezcla densa en caliente (MDC-19) que a su vez se utiliza como indicativo para la comparación de los resultados arrojados por los ensayos.

En la realización de los ensayos y a lo largo del documento, se observa que los resultados de dichos ensayos siempre presentan mejores parámetros en las mezclas asfálticas modificadas con CCA (ceniza de cascarilla de arroz), por consiguiente, se puede señalar que es una alternativa viable técnica y ambientalmente para la construcción de capas bituminosas en las estructuras de pavimento de nuestro país.

Palabras Clave: Desechos, mezcla asfáltica modificada, solución técnica y ambiental.

ABSTRACT

The relationship between social and economic development is directly proportional to the density and quality of the road network, that is why it is necessary to implement technical solutions that, accompanied by environmental responsibility, lead to the improvement of our country.

In Colombia 500,000 hectares are destined for rice cultivation in 215 municipalities located in the eastern plains, Tolima, Huila, Santanderes and something in the departments of the North Coast such as Magdalena, Córdoba, Sucre and Cesar, the annual production of rice corresponds to 1,7 million tons annually of which 18% is waste (husk) obtained after the threshing

This is why the present work performs the mechanical characterization of three types of asphalt mixture whose mineral filler is replaced by different concentrations of rice husk ash in order to determine if said mixtures meet technical parameters by analysing them with the test methods: Marshall Flow and Stability (I.N.V. E-748-07), Indirect Traction (I.N.V. E-725-07) and Cántabro (I.N.V. E-760-07), these mixtures are made with the gradation of a MDC-hot dense mixture¹⁹ which is used as a reference point for the comparison of test results.

In carrying out the tests and throughout the document it is noted that the results of these tests always show better parameters for modified asphalt mixtures with rice husk ash, It can therefore be noted that it is a technically and environmentally viable alternative for the construction of tar layers in our country's pavement structures.

Keywords: Waste, Modified asphalt mixture, technical and environmental solution.

INTRODUCCION

En Colombia se presenta un auge en el desarrollo de infraestructura vial dado al cambio que representan los acuerdos de paz firmados en el 2017 con las guerrillas de las FARC, por tal motivo el país requiere investigaciones que atiendan ese requerimiento de desarrollo que representa la construcción y mejora de la malla vial necesario para el desarrollo de la nación de esta forma mejorando los tiempos y calidad de transporte terrestre en cuanto a pasajeros y mercancías se refiere.

Para cumplir los objetivos viales que se trace el país es necesario implementar procesos responsables con el medio ambiente que trabajen conjuntamente con el factor técnico y económico para llevar a buen término todos los proyectos necesarios para lograr el desarrollo vial que requiere el país.

En el 2017 en Colombia se produjeron 3.048.994 Toneladas de arroz paddy verde el residuo del trillado del arroz representa el 18% del arroz paddy verde que corresponde al grano cosechado sin ningún proceso de selección y secado (Fedearroz, 2018); es decir la cantidad de residuo del trillado obtenido de la cosecha nacional de 2017 fue de 548.818 Toneladas.

El material más usado en Colombia para la construcción de carpetas de rodadura es la mezcla asfáltica compuesta por un cemento asfáltico (resultado de la refinación del petróleo) que actúa como ligante de agregados gruesos y finos generalmente de origen pétreo que después de compactado ofrece una superficie adecuada para el transito requerido.

Por esto surge la iniciativa de investigar sobre el comportamiento mecánico de cuerpos de prueba de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de la ceniza resultante del trillado del arroz, una estrategia amigable con el medio ambiente por darle un uso que no impacte negativamente pues la gran mayoría de estos residuos son incinerados o simplemente acopiados en un lugar para su descomposición de esta manera desaprovechando totalmente el potencial de este residuo para ser utilizado en otros ámbitos, su implementación es acorde con las necesidades viales del país y representa una manera sostenible de adicionar las mezclas asfálticas puesto que evita la disposición indebida al que generalmente es expuesto este residuo de la producción de este cereal tan cultivado en las zonas tropicales de Colombia.

En congruencia con lo mencionado anteriormente se realizará la caracterización mecánica de cuerpos de prueba modificados con ceniza de los residuos de la molienda del arroz y cuerpos de Mezcla Densa en Caliente (MDC-19), comparando los resultados obtenidos de cada tipo de mezcla de los ensayos (Marshall, Tracción indirecta, Cántabro), para poder definir la viabilidad técnica de la utilización de mezcla asfáltica modificada con residuos de la molienda del arroz.

Así mismo es importante mencionar diversos estudios que se han realizado ampliando el conocimiento sobre nuevos materiales asfálticos con el objetivo de buscar materiales alternativos, mayor información pueden ser consultados en: (Bastidas et al., 2019), (Camapum et al., 2020) y (Ruge et al., 2019)

La universidad libre de Bogotá presenta el estudio de la ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero, en él se presenta la caracterización de la CCA (ceniza de cascarilla de arroz) a un tamaño de partícula adecuado para un mejor desempeño como agregado fino en adhesivos tipo mortero, es aplicado en la colocación de baldosas cerámicas, así mismo se permite el análisis de propiedades físicas y químicas de los agregados, y el comportamiento mecánico de fluidez y resistencia a la tracción del mortero obtenido con el reemplazo parcial de la arena en porcentajes desde 5% hasta el 25% . (Vasquez Piñeros & Becerra Leon, 2016)

La revista Latinoamérica de Metalurgia y Materiales ha presentado el estudio de la aplicación de la CCA(Ceniza de cascarilla de arroz) la cual es obtenida en un proceso agro-industrial, esta es utilizada en la fabricación de bloques en concreto no estructurales, el estudio logra desarrollar la solución como aprovechamiento del residuo agro-industrial como lo es la CCA(Ceniza de cascarilla de arroz), el estudio se realizó en el municipio de Jamundí, la ceniza resultante del proceso de combustión presenta un porcentaje de sílice de 29.83%. Este residuo se incorpora en la mezcla de concreto para así estudiar su efecto como puzolana en la sustitución parcial del cemento Portland tipo I y como agregado fino en la fabricación de bloques macizos y no estructurales. Los resultados mostraron que la relación cemento: agregado, de 1:6 y la adición del 20% de CCA actuando como llenante mineral y puzolana es la composición óptima para el uso de este residuo agro-industrial. (Mattey, Robayo, Diaz, Delvasto, & Monzo, 2015)

La universidad La Gran Colombia ha presentado el estudio de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como impermeabilizante natural para muros en adobe, con el propósito de brindar beneficios con este producto, la investigación da solución a la necesidad de protección contra la humedad a las viviendas en adobe, es un propuesta ecológica, amigable con el medio ambiente y de bajo costo, se llegó a la conclusión que el uso del residuo cascarilla de arroz no es suficiente pero este puede mejorarse, beneficiando a la construcción con las propiedades del material, las cuales dan la capacidad de resistir e impedir el paso del agua. Se pueden mantener por más tiempo las condiciones físicas del adobe al enfrentarse a la humedad con la aplicación del impermeabilizante natural de ceniza de cascarilla de arroz, destacando siempre al momento de prepararlo teniendo muy en cuenta las dosificaciones para la mezcla de los materiales, puesto que, si queda muy clara o

muy espesa, puede retrasar el secado de las capas o de que permanezca por poco tiempo adherida a la superficie del adobe.

1. GENERALIDADES

1.1. LINEA DE INVESTIGACION

Materiales

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿La utilización de la CCA (ceniza de la cascarilla de arroz) como llenante mineral para la realización de mezcla asfáltica modificada conserva parámetros físico-mecánicos aceptables para su implementación y genera una mitigación de la huella de carbono por la utilización de residuos de la industria arroceras?

1.2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Los asfaltos convencionales utilizado en la construcción de mallas viales tienen propiedades y características que en la actualidad no son optimas para satisfacer las diversas necesidades debido al incremento de flujo vehicular, por ende, se buscan soluciones que ayuden a mejorar las características de las mezclas asfálticas, así mismo su comportamiento en las diversas situaciones. (Pedraza Diaz & Forigua Orjuela, 2014)

El estudio de asfaltos con la adición de llenante mineral de ceniza de cascarilla del grano de arroz muy poco se ha estudiado, más si se han generado informes con énfasis en la reutilización de este subproducto en aplicaciones como materia prima en diferentes procesos, como reforzante en el sector de polímeros y empleado como adiciones en morteros.

Se tiene como necesidad el poder generar mezclas asfálticas que garanticen resistencia y durabilidad durante todo su periodo de vida, esto ha llevado a investigar como han evolucionado las mezclas asfálticas convencionales con los diferentes agentes modificadores, estos aportan ciertas características de cambio en los parámetros del diseño Marshall. Las investigaciones que se han adelantado hasta la fecha entre ellos el caucho y los diferentes polímeros han mostrado resultados muy favorables con respecto a los criterios de diseño. Recientes investigaciones han permitido el uso de la CCA (ceniza de cascarilla de arroz) adicionada a las mezclas asfálticas convencionales, generando resultados muy favorables.

En la producción industrial del arroz se obtiene una cáscara que hasta el momento no ha sido utilizada en esta industria y más de la mitad es desechada, la parte comercializada es llevada a fábricas donde las utilizan como combustible generando grandes cantidades de ceniza, esto podría ser la consecuencia de otro problema ambiental debido al gran porcentaje de ceniza que se genera, el proyecto

“evaluación del comportamiento del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz” pretende estudiar los efectos del RHA(Rice Husk Ash) o en español CCA(Ceniza de cascarilla de arroz) como un agente modificador del asfalto convencional. Las cenizas fueron utilizadas en 5 porcentajes modificadores de peso diferentes como lo fueron (4,4.5,5,5.5,6). Cada uno de ellos se sometió a diversas pruebas; punto de ablandamiento, viscosímetro rotacional, adherencia Stripping, gravedad específica, adherencia en bandeja y penetración, donde el número total de muestras fue 114. Posterior a esto se realizó la caracterización de sus propiedades con el fin de poder comparar los asfaltos modificados con el convencional, determinando así que el RHA mejora las propiedades mecánicas y reológicas del agente bituminoso. (Parra Bechara & Gallo Ortiz, 2018)

Debido a las características geológicas que la zona norte del Tolima, los suelos en su mayoría de origen volcánico, los cuales en su estado natural o mejorados con arteriales granulares, son utilizados como material soporte tipo subrasante para la construcción de una estructura de pavimento, en el proyecto “caracterización del comportamiento geotécnico. los subsuelos de origen volcánico estabilizado con ceniza de arroz y bagazo de caña como material para subrasante” se plantea la utilización de este tipo de suelos con un proceso de estabilización a través de la adición de ceniza de biomasa proveniente de la calcinación de la cascarita de arroz y bagazo de caña, se evaluó el comportamiento geotécnico, relacionado con las características físicas, mecánicas, susceptibilidad a la humedad, características de plasticidad, resistencia y trabajabilidad entre otras. se llegó a la conclusión de que el suelo es susceptible, debido a que su plasticidad es afectada por la variación de la humedad, se determinó que la compactación como método estabilizador proporciona mejores características mecánicas en los suelos volcánicos, el situó agroindustrial, genera un gran aporte en la resistencia del suelo, en comparación con lo obtenido en condiciones iniciales, indicando que el CCA(Ceniza cascarilla de arroz) y CBCA(Ceniza bagazo de caña de azúcar) provocan un efecto cementante en la subrasante debido a sus propiedades puzolánicas lo que evidencia un incremento de la resistencia del suelo volcánico. (Claveria, Triana, & Varon, 2018)

La cascarilla de arroz (CCA) se ha convertido en el desecho principal de los diferentes procesos de la molienda del arroz, sus características hacen que este material sea un desperdicio de alta complejidad, Su origen se remonta al mismo cultivo, en la medida que la cascara juega un papel en la protección del grano. Lo que implica que el manejo de la CCA (cascarilla de arroz) es un grave problema que le corresponde a los cultivadores como a los productores. Durante los últimos años, la industria ha venido transformando la cascarilla de arroz a través de las quemas. Por razones legales como ambientales, esta misma industria se ha visto obligada a implementar esquemas en el manejo de este sub producto, como la incineración de la misma en hornos especiales, sin que esto solucione el problema de fondo. En el

proyecto se da a conocer el uso de la CCA en la ingeniería, usándola como agregado tanto para las mezclas asfálticas como para la hidráulica. Para esto se toma la ceniza de la cascarilla de arroz para ser implementada como agregado fino en la mezcla asfáltica, en la hidráulica se usa en su estado original. (Pinzon, 2018)

Para conocer el comportamiento de una mezcla asfáltica, se debe tomar en cuenta unos factores como son las diferentes proporciones volumétricas del asfalto y componentes de los agregados, para así determinar los distintos parámetros de comparación de las propiedades de la mezcla asfáltica, en el informe “estudio comparativo de mezclas asfálticas aplicando el método Marshall con la adición de ceniza de cascarilla de arroz, caucho triturado con los agregados de los ríos Magdalena y Saldaña” se realiza la aplicación de la metodología de Marshall, que es el método más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas, se realizó con material de los ríos Cucuana, Saldaña y Magdalena; para poder indicar cual contenido de asfalto óptimo de una mezcla asfáltica, y comparar las variaciones que tiene cada material extraído de los ríos. También se realiza la adición de ceniza de cascarilla de arroz y caucho triturado a dichos agregados. La adición de caucho proveniente de los neumáticos en las mezclas asfálticas modificadas con este material permite obtener un mejor resultado a los cambios térmicos, fisuras por fatiga y envejecimiento, con el propósito de aumentar la vida útil del pavimento, el segundo aditivo que es la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), que esta compuesta entre el 90-96% por sílice volcánico, hará que proporcione materiales más resistentes, menos deformables y más durables. (Gomez Doncel & Chicue Lozano, 2015)

Se han desarrollado estudios de temas como lo es la incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en el asfalto para una mezcla asfáltica MDC-2, por parte de estudiantes de la Universidad Piloto y con la dirección de la Ingeniera Sandra Pinzón Galvis, el tema fundamental de los estudios es la adición de la ceniza de cascarilla de arroz, a una mezcla asfáltica en caliente convencional, con el propósito de investigar el efecto sobre sus propiedades. Encontrar materiales en el mercado que den a las mezclas asfálticas durabilidad y resistencia es sin duda alguna una de las grandes preocupaciones, por tal razón, se ha direccionado en ese sentido el uso de la cascarilla de arroz, para que en el futuro como agente modificador mejore los pavimentos de la malla vial. Los semilleros de la universidad Piloto demostraron en las etapas 1 y 2 que si es posible mejorar algunas características de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA). (Osorio Ortiz, Palma Huertas, & Rivera Bermudez, 2009)

1.3. JUSTIFICACION

La contaminación ambiental causada por el hombre ha incrementado al pasar de los años, contribuyendo poco a poco a un daño irreparable al entorno en el que vive. Muchas veces, por lograr grandes avances en cuanto a tecnología para tener un mejoramiento del estilo de vida de las personas, se han llevado a cabo excesos en cuanto los recursos brindados por nuestro planeta, llegando al punto del agotamiento de los mismos, así como el descarte de muchos otros llamados “residuos” sumándose a todo lo anteriormente dicho, las emisión de gases tóxicos al medio ambiente, esto está causando un deterioro a la capa de ozono y causando cambios, que podrían volver irreversible de corregir, provocando a largo tiempo enfermedades en los seres humano y la extinción de un sin número de especies.

Las carreteras son muy importantes en la infraestructura de un país ya que ayudan al desarrollo económico y cultural, pero dentro del país en su gran mayoría, en la actualidad algunas mallas viales se encuentran deterioradas, presentando un bajo rendimiento y una respuesta inadecuada ante las cargas vehiculares, la temperatura y el ambiente.

Para generar un pavimento adecuado a los diferentes escenarios que se puedan presentar, unos de los factores más importantes es la obtención de un diseño de mezcla que se adapte a estos escenarios y permitan que la infraestructura vial tenga una respuesta optima; el principal objetivo en el diseño de una mezcla asfáltica poder determinar la proporción optima de agregados y asfalto que nos garantice un mayor grado de desarrollo del pavimento, una manejabilidad adecuada para su colocación, el diseño de mezcla ha permitido durante los últimos siglos generar asfalto que por sus propiedades ligantes han sido utilizado en la pavimentación de todo tipos de vías a nivel nacional, por ende esto ha generado una gran demanda lo cual ha conducido a las diferentes empresas que producen mezclas asfálticas, para así buscar una forma de optimizar los procesos de fabricación y aplicación, una reducción en los costos y lo más importante una reducción de los impactos ambientales, ya que en los últimos años el ambiente se ha visto muy comprometido debido a los diferentes efecto secundarios que genera la industria.

A través de los años se ha obtenido que los diferentes tipos de mezclas asfálticas convencionales distan de tener un comportamiento ideal con respectos a su susceptibilidad térmica. Se han adelantado un sin numero de intentos por modificar las propiedades mediante la incorporación de materiales que poseen distintas naturalezas como: cauchos, fibras de vidrio, desperdicios de plásticos y fibras de acero.

Desde el punto de vista de la línea de investigación de materiales y de la elección temática escogida se ve la necesidad de desarrollar mezclas asfálticas que tengan mayor durabilidad y una menor deformabilidad ante las solicitudes del tráfico, que estén menos influenciadas por factores climáticos, calidad del cementos, encarecimiento de energía, incrementos de cargas de los ejes, aumento de automotores, etc., esto ha generado un nuevo impulso hacia las empresas y constructores a investigar y producir asfaltos modificados.

Con la mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con llenante mineral de ceniza de residuos de la molienda del arroz, sé busca proponer una nueva alternativa para el diseño de mezclas asfálticas, que traiga consigo una disminución en los recursos convencionales utilizados en mezclas asfálticas convencionales y el aprovechamiento de la ceniza de la cascarilla del arroz, ya que este es un deshecho agroindustrial que se producen en gran cantidad en lugares tropicales donde se siembra y se procesa la planta de arroz.

Mediante la utilización de este material se buscan mejoras como la disminución a la susceptibilidad térmica en el pavimento, mejoras como las flexibilidad y elasticidad, un mejor desempeño ante la fatiga y un aumento de la resistencia al envejecimiento aspectos que son claves a la hora de evaluar su durabilidad, buscando siempre el aumento de la vida útil del pavimento, por ende se puede considerar como un material con un gran potencial ya que ofrece una alternativa de alta viabilidad para los diseños de mezcla asfálticas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de mezcla asfáltica modificada con llenante mineral de ceniza de residuos del trillado del arroz.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

-) Evaluar los valores resultantes del ensayo Marshall de las variables estabilidad y flujo, de mezcla asfáltica modificadas con ceniza del residuo del trillado del arroz.
-) Analizar los parámetros derivados del ensayo de tracción indirecta en seco de mezclas asfálticas modificadas con agregado fino de ceniza de cascarilla de arroz.
-) Interpretar los resultados de pérdida por desgaste del ensayo de cántabro con cuerpos de prueba elaborados con mezcla asfáltica modificada con desecho del trillado del arroz.

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, estas se agregan al material asfáltico durante su producción para modificar sus propiedades como: la susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento. Como se cita en “Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Heshmat., 1997) Los ligantes asfálticos tradicionales tienen limitaciones en su respuesta a las cargas que día a día aumentan su frecuencia y su intensidad, sin olvidar la acción del clima que en muchos proyectos han generado ondulamientos y agrietamientos prematuros. En consecuencia, es necesario buscar y desarrollar materiales más resistentes que alarguen el periodo de servicio y disminuyan los gastos de conservación. Los ligantes modificados han demostrado capacidad para mejorar el comportamiento de los tradicionales, dando la oportunidad de adecuarlos a unas condiciones específicas de respuesta en los proyectos. (H. L., Arenas Lozano, 2011)” (Pedraza Diaz & Forigua Orjuela, 2014)

2.1.1. ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHAL (INV E-748-07)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas. El método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1”).

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes.

El procedimiento se inicia con la preparación de probetas de ensayo, para lo cual los materiales propuestos deben cumplir con las especificaciones de

granulometría y demás, fijadas para el proyecto. Además, se deberá determinar previamente la gravedad específica bulk de los agregados, así como la gravedad específica del asfalto, y se deberá efectuar un análisis de densidad de vacíos con las probetas compactadas.

Los agregados se deberán sacar hasta masa constante a una temperatura entre 105° C y 110° C (221° F y 230° F) y se separarán por tamizado en los tamaños deseados.

La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas, será la requerida para producir una viscosidad de 170 \pm 20 centiStokes. (1 centiStokes = 1 mm² /s).

En bandejas taradas, separadas para cada fracción de la muestra, se pesarán sucesivamente las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con la gradación necesaria para la fabricación de cada probeta. Se calentarán los agregados en una plancha de calentamiento o en el horno a una temperatura de 28°C (50°F) por encima de la temperatura de mezcla. A continuación se mezclan los materiales lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea.

Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar, placa de base y la base del martillo de compactación, se limpian y calientan en un baño de agua o en el horno a una temperatura comprendida entre 93.3° C y 148.9° C (200° F y 300° F).

Se aplican 50 o 75 golpes según se especifique, de acuerdo con el tránsito de diseño, empleando para ello el martillo de compactación una caída libre de 457.2 mm (18"), manteniendo el eje del martillo perpendicular a la base del molde durante la compactación. Se retiran la placa de base y el collar, se colocan en los extremos opuestos del molde; se vuelve a montar éste en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra.

Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 o 40 minutos o en el horno durante 2 horas, manteniendo el baño o el horno a 60° \pm 1° C (140° \pm 1.8° F) para las muestras de cemento asfáltico y a 37.8° \pm 1° C (100° \pm 1.8° F), se retira una probeta del baño de agua u horno y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa, se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo, se aplica, a continuación, la carga sobre la probeta con la prensa a una tasa de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye, según se lea en el dial respectivo. Se anota el valor máximo de carga registrado en la máquina de ensayo o, si es el caso, la lectura de deformación del dial indicador, la cual se

convierte a carga, multiplicándola por la constante del anillo. El valor total en Newtons (kgf) que se necesite para producir la falla de la muestra se registrará como su valor de estabilidad Marshall, se anota la lectura en el medidor de flujo en el instante de alcanzar la carga máxima. Este será el valor del "flujo" para la probeta, expresado en mm, e indica la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. (Instituto nacional de vías INVIAS, 2013)

2.1.2. ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA (INV E 725-07)

Este método de prueba establece los procedimientos para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este método de prueba es aplicable a las mezclas densas y se usa para evaluar el efecto de la humedad en las mezclas elaboradas con o sin aditivo adhesivo (antistripping), incluidos líquidos y sólidos pulverulentos, tales como cal hidratada o cemento Portland.

La susceptibilidad de daño por humedad se determina preparando un grupo de especímenes compactados en el laboratorio de acuerdo con la fórmula de trabajo de la mezcla, sin aditivos. Los especímenes son compactados a niveles de vacíos que oscilan entre 6 y 8%. El grupo es dividido en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un grupo es mantenido en seco mientras que el otro es parcialmente saturado con agua y acondicionado en un baño de agua. La resistencia a la tracción de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad es indicado por la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo y la del subgrupo seco.

Este método de prueba se puede usar para probar mezclas de concreto asfáltico junto con la mezcla de diseño, para determinar el potencial de daño por humedad, para determinar si un aditivo adhesivo es efectivo o no y para encontrar la cantidad óptima de aditivo para maximizar su efectividad. Este método de prueba puede ser usado también para evaluar mezclas producidas en planta con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en el campo.

Se hacen, por lo menos, seis especímenes para cada prueba, tres para ser probados en seco y tres para ser probados después de la saturación parcial y acondicionamiento en baño con agua en general, se deben usar especímenes de 102 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2.5") de altura, pero también se pueden utilizar especímenes de otras dimensiones, si se desea. Al emplear agregado con tamaño mayor de 25 mm (1"), se deben usar especímenes de 150 mm (6") de diámetro, cuando se añade polvo seco a un agregado seco, el lote de

agregado mineral se seca y calienta a $150^{\circ} \pm 6^{\circ} \text{ C}$ ($300^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{ F}$). Se añade la cantidad requerida de aditivo al agregado y se mezcla completamente la masa entera hasta que se haya obtenido una distribución uniforme del aditivo. Se debe tener cuidado de minimizar la pérdida de aditivo en la atmósfera en forma de polvo. Después de mezclado se debe mantener el agregado tratado a la temperatura requerida de mezcla hasta que sea usado.

Se determina la gravedad específica máxima teórica de la mezcla, se determina la altura de los especímenes de acuerdo con la norma también se determina la gravedad específica bulk de los especímenes compactados y se expresa el volumen de cada espécimen en centímetros cúbicos. Se calcula el % de volumen de vacíos con aire respecto del volumen total (%Vv) de cada espécimen y se expresa el volumen de aire en centímetros cúbicos. El volumen de vacíos del espécimen se calcula multiplicando el volumen total por el porcentaje de vacíos, dividido entre 100, (%Vv/100). Se clasifican los especímenes en dos subgrupos, de tal forma que el promedio %Vv en los dos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco.

Se satura parcialmente con agua destilada a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado húmedo, utilizando una cámara de vacío. Si es difícil de alcanzar el grado mínimo de la saturación requerida, el agua para saturación puede ser calentada a 60°C (140°F), aplicando un vacío parcial de 525 mm Hg (20" Hg) o 70 kPa durante un tiempo tan corto como cinco minutos.

Se determina el volumen del espécimen parcialmente saturado de acuerdo con la norma INV E – 733. Se determina el volumen de agua absorbida, substrayendo la masa seca en el aire del espécimen así mismo la masa del espécimen parcialmente saturado y superficialmente seco. Se calcula el grado de saturación dividiendo el volumen del agua absorbida por el volumen de vacíos con aire del espécimen y se expresa como porcentaje. Si el volumen de agua está entre 55 y 80% del volumen de aire, se continúa. Si es menor de Instituto Nacional de Vías E 725 - 6 55%, se repite el procedimiento que inicia en la Sección 7.6.1 usando un vacío parcial ligeramente superior. Si el volumen de agua es mayor de 80%, el espécimen se ha dañado y se tiene que descartar.

Inmediatamente después de chequear la saturación se acondicionan los especímenes parcialmente saturados, colocándolos en un baño de agua destilada a $60 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) durante 24 horas un congelador de aire a $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($-0.4 \pm 3.6^{\circ}\text{F}$). Después de, por lo menos, 15 horas en el congelador de baño de aire, se retiran los especímenes y se sumergen en un baño de agua a $60 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) por 24 horas. Después de 3 minutos de inmersión, cuando se descongele la superficie del espécimen, se retiran la bolsa y la envoltura de los especímenes. Se determina la absorción de agua y el grado de saturación. Un grado de saturación que exceda a 80% es aceptable.

Se ajusta la temperatura del subgrupo seco, colocando los especímenes en un baño de agua a $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) durante 20 minutos, se determina la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$).

Se coloca un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas, en el plano diametral vertical. Se aplica una carga del diametral a una rata de deformación 50 mm/min (2"/min) hasta que se alcance la carga máxima y se registra, se continúa cargando hasta fracturar el espécimen. Una vez desmontado el aparato se abre y se estima visualmente el daño causado por la humedad. Se inspeccionan todas las superficies, inclusive las caras falladas, para buscar evidencia de agregado resquebrajado o roto que pueda influenciar los resultados de la prueba y se registran las observaciones.

Se calcula la resistencia a la tensión como sigue:

$$R = (2000 * P / T * t * D) [k]$$

Dónde:

Rt = resistencia a la tensión, kPa (psi)

TT= Constante pi.

P = máxima carga, N (lbf)

t = altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba, mm (pulgadas.)

D = diámetro del espécimen, mm (pulgadas.).

(Instituto nacional de vias INVIAS, 2013)

2.1.3. ENSAYO CANTABRO (INV E-760-07)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la máquina de Los ángeles. El procedimiento se puede emplear tanto en el proyecto de mezclas en laboratorio, como para el control en obra de las mismas, el procedimiento se aplica a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo sea inferior a 25 mm.

El ensayo permite valorar directamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originada por el tráfico en general, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15° y 30°C , con una tolerancia máxima de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Se determina la masa de cada probeta y se anota este valor como P1. Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo un mínimo de seis (6) horas.

Se introduce a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

Al final del ensayo, se saca la probeta y se determina de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g, anotando este valor como P2.

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = (P1 - P2 / P1) * 100$$

Donde:

P = valor de la pérdida por desgaste, en %.

P1 = masa inicial de la probeta, en gramos.

P2 = masa final de la probeta, en gramos.

(Instituto nacional de vías INVIAS, 2013)

2.1.2. MATERIAL LIGNOCELULOSICO

La cascarilla de arroz es uno de los residuos agroindustriales que más cenizas con sílice genera, se calcula que cada tonelada de arroz genera 180 kilos de cascarilla, estas terminan convertidas en aproximadamente 20kg de ceniza, del procesamiento del arroz se generan 460.000 toneladas anuales de cascarilla, las cuales podrían convertirse en un insumo para la industria de la construcción, enfocada en el área de vías, algunas empresas de diferentes sectores adelantas investigaciones en este campo y tienen como objetivo fabricar materiales de construcción de alta calidad a partir de este desecho.

Se estudió la posibilidad de producir concretos de alto desempeño HPC(High performance concrete) mediante el uso de un material puzolánico de alta reactividad elaborado a partir de ceniza de cascarilla de arroz tratada químicamente ChRHA(Highly reactive pozzolan made from chemically treated rice husk ash) y preparada mediante un ataque térmico-químico a la cascarilla de arroz, dicha ceniza consiste de 99% sílice de alta amorfidad, blanca, con mayor actividad puzolánica que el humo de sílice y que la ceniza de cascarilla de arroz preparada únicamente con tratamiento térmico. Las características físicas, químicas y mineralógicas de las cenizas producidas fueron analizadas. Evaluaron la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la absorción de agua, la resistencia a la carbonatación, la carga total que pasa, derivada del ensayo rápido de permeabilidad a cloruros RCPT(Rapid chloride permeability test) y el módulo de elasticidad de los concretos endurecidos. (Salas, Delvasto, & Mejia de Gutierrez, 2013)

Se realizó un estudio del comportamiento de la cascarilla de arroz (CCA) como material de agregado en porcentajes de peso dentro de mezclas de mortero seco para la producción de prefabricados, se generaron 5 diseños de mezclas diferentes en las cuales varía el porcentaje adicionado de cascarilla de arroz mientras se reduce el porcentaje en peso del agregado, presentando los resultados obtenidos como gráficas de variación de peso y resistencia a compresión vs días para los 6 diseños. Analizando la reducción de peso y de resistencia según cada diseño, se incluye la cascarilla de arroz (CCA) en el diseño de mezcla, siendo esta reemplazada en el material arenoso, de esta manera se bajan los costos de producción, ya que el agregado es el más costoso, al adicionar progresivamente la cascarilla a la mezcla, la resistencia disminuye, el diseño de mezcla 8% tiene buena resistencia dando como resultados 15 Mpa(2150 PSI), la adición de cascarilla de arroz no tiene un beneficio económico representativo en costos de producción de los elementos prefabricados, pero si se manifiesta de forma marcada en la disminución del peso total de la estructura. (Alvarez Garcia & Ardila Perez, 2011)

2.1.3. FORMA DE UTILIZACION DEL MATERIAL LIGNOCELULOSICO COMO MODIFICADOR

Se realiza el estudio del comportamiento mecánico del resultado de los ensayos de estabilidad y flujo, tracción en seco y cántabro a (3) tres tipos de mezcla con un porcentaje de 6% de finos y tomando un 5,5% de cemento asfáltico.

Se realiza la ignición de la cascarilla del arroz hasta lograr la combustión necesaria para que el material se vuelve ceniza, este material resultante se homogeniza con los materiales pétreos necesario para configurar los cuerpos de prueba con las mezclas planteadas:

El primer tipo consiste en una mezcla asfáltica de control MDC-19 cuyo porcentaje de agregado fino mineral corresponde al 6%.

El segundo tipo corresponde a una mezcla asfáltica cuyos finos están constituidos por un 3% de llenante mineral petreo y un 3% de llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz,

El tercer tipo de mezcla está conformada por un 6% de llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz.

2.2. MARCO TEORICO

Estamos en una época la cual es crucial en el desarrollo futuro de la humanidad enmarcada en contextos integrales sobre protección ambiental. El interés del ser humano se debe a varios factores, entre los cuales se puede destacar las nuevas tendencias en sustentabilidad, entre otros. Estos factores generan otra visión en las tendencias para aprovechar los recursos naturales. Recursos naturales como los materiales lignocelulósicos que juegan un papel muy importante debido a la disponibilidad de este subproducto y las diferentes agroindustriales que lo generan. (Castillo Alvarez, y otros, 2012)

Además, debido al inminente agotamiento de los recursos petrolíferos en el mundo, es necesario encontrar tecnologías novedosas utilizando recursos renovables, el tratamiento de estos desechos sólidos que producen contaminación del ambiente es uno de los temas de mayor importancia en la actualidad; ya que se buscan formas adecuadas para su manejo y disposición final, de manera tal que no dañen el ambiente, sino que por el contrario sea posible la incorporación de estos a diferentes tecnologías en los ámbitos de la construcción, esta ha ganado presentando una tendencia que día a día gana más fuerza conforme pasa el tiempo, ya que se obtienen productos similares a los provenientes de materias primas comerciales, y que además son amigables con el ambiente.

La cascarilla de arroz es un subproducto generado del proceso de molienda del grano de arroz proveniente de los campos de cultivo, tiene varias aplicaciones incluyendo: Conversión de los biomas: se obtienen azúcares que pueden ser convertidos a otros químicos orgánicos, como por ejemplo etanol y furfural, en la elaboración de abonos y material para el cultivo de hongos, obtención de papel y de pulpa, en materiales de construcción, combustible, obtención de productos de silicio, a partir de la cascarilla o de sus cenizas.

La cascarilla de arroz tiene una naturaleza fuerte, leñosa y abrasiva; por lo cual es resistente a factores ambientales, protegiendo al grano de arroz de sufrir deterioro durante el tiempo de desarrollo de la planta de arroz, a causa del ataque de insectos o de hongos, no es apta para el consumo humano debido a su alto contenido de sílice, aunque en algunos casos, se usa para la alimentación de animales de granja. (Echandi, 1975)

En cuanto a su dureza, esta es debida al silicio que este contenido en la cascarilla, por lo que se le utiliza de abrasivo para la limpieza de ciertos materiales como hierro, acero, aluminio, latón, bronce, dado que el tamaño de la sílice es tan fino que no raya el metal. (Angladette, 1969)

La conductividad térmica de la cascarilla de arroz es baja, inclusive su valor puede compararse bien con la conductividad térmica de excelentes materiales aislantes. (Bienvenido., 1985) Además, el hecho de que la cascarilla de arroz tenga una alta temperatura de incineración, hace que no se queme fácilmente. Estas características son provechosas cuando la cascarilla de arroz forma parte de un material de construcción, cemento o de polímeros reforzados, donde se combinan su capacidad como aislante y su resistencia al fuego para proveer un material más resistente.

Actualmente, el principal ingrediente utilizado en el asfalto y los selladores de los techos es un subproducto proveniente de la extracción del petróleo: el betún. Pero el petróleo al ser un recurso no renovable, y altamente contaminante, la decadencia de su mercado supone que sea más difícil la obtención del betún de mayor calidad posible, por lo tanto, las empresas están siendo obligadas a buscar alternativas.

Es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, alcalinos y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (UMSS, 2010)

2.3. MARCO LEGAL

El presente trabajo se realizó bajo la normatividad vigente establecida por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, la cual hace parte de los contratos celebrados por la entidad, a través del documento técnico “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras”, la cual reglamenta las especificaciones de mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo) y sus criterios de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall, Artículo 450-13.

3. METODOLOGIA

Con el fin de conocer el comportamiento mecánico en el laboratorio de la mezcla asfáltica modificada con llenante mineral a base de ceniza de cascarilla de arroz se realizó el siguiente proceso:

3.1. PROCEDIMIENTO INCIAL

Se realiza la ignición de la cascarilla resultante de la molienda del arroz, con el fin obtener la ceniza de la cascarilla es necesario realizar el proceso de combustión de 11kg de cascarilla con el fin de obtener más de 1000g y utilizar 966g de ceniza necesaria para 18 briquetas modificada con llenante mineral de dicho material.



Figura 1 Pesaje de la cascarilla resultante de la molienda del arroz



Figura 2 Incineración de la cascarilla de arroz para obtención de la ceniza

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.43	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
		% PASA									
DENSA	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10

Tabla 1 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

Para seguir el proceso se realiza la elaboración las briquetas de las diferentes mezclas asfálticas propuestas, Se realizaron 27 briquetas de 4" para cada tipo de mezcla, siendo así 9 briquetas para ensayo de estabilidad, 9 briquetas para el ensayo de tracción en seco, y 9 briquetas para el ensayo de cántabro, para cada tipo de mezcla realizada se utilizó el mismo porcentaje de asfalto óptimo de 5,5%.



Figura 3 Briquetas elaboradas para ensayos en el laboratorio

En cada caso se homogeniza el cemento asfáltico con los agregados minerales y para las briquetas modificadas se adicionó la ceniza de la cascarilla de arroz, se aplica aditivo para lubricar el molde y proceder con la compactación, después de realizar 75 golpes a la altura de 457.2mm por cada acara se procede a extraer la briqueta del molde. (Insituto nacional de vias INVIAS, 2013)



Figura 4 Compactación de las briquetas

3.2. TIPOS DE MEZCLAS A EVALUAR

3.2.1. TIPO DE MEZCLA #1

El primer tipo de mezcla a evaluar corresponde a una mezcla asfáltica de control MDC-19 cuyo porcentaje de fino mineral corresponde al 6% (agregado fino de origen pétreo), a este tipo de mezcla corresponden las briquetas No. 1,2,3,4,5,6,7,8,9 (1-9).

3.2.2. TIPO DE MEZCLA #2

El segundo tipo de mezcla propuesta corresponde a una mezcla asfáltica cuyos finos están constituidos por un 3% de llenante mineral y un 3% con ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz, (llenante mineral modificado al 50% con ceniza de cascarilla), las briquetas que se realizaron con este tipo de mezcla corresponden a las No. 10,11,12,13,14,15,16,17,18 (10-18)

3.2.3. TIPO DE MEZCLA #3

El tercer tipo de mezcla analizada corresponde a una mezcla asfáltica con el 100% de la llenante mineral con ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz, las briquetas conformadas con este tipo de mezcla corresponden a las No. 19,20,21,22,23,24,25,26,27 (19-27).

3.3. ENSAYO DEL METODO MARSHALL

Se realiza el ensayo Marshall sobre tres (3) replicas con el objeto de encontrar la carga máxima (estabilidad) que el material puede soportar a una temperatura de 60°C y la deformación diametral (flujo) que las probetas experimentan, así mismo se determina el parámetro de rigidez que corresponde al valor de estabilidad / flujo

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, fallándolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes.

Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 o 40 minutos o en el horno durante 2 horas, manteniendo el baño o el horno a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{ F}$) para las muestras de cemento asfáltico y a $37.8^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$ ($100^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{ F}$). Se limpian perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo antes de la ejecución de éste, adicionalmente se lubrican las barras guías de tal manera que la mordaza superior se deslice libremente, la temperatura de las mordazas se deberá mantener entre 21.1° C y 37.8° C (70° F a 100° F), empleando un baño de agua cuando sea necesario.

Se retira una probeta del baño de agua u horno y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa adicionalmente se posiciona el medidor de flujo, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo. La metodología del ensayo se presenta en la Figura 5



Figura 5 Ejecución del ensayo Marshall: (a) Determinación de la masa seca; (b) Maquina de ensayo Marshall; (c) Inmersión de la briqueta antes del ensayo Marshall.

Se aplica a continuación la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye, según se lea en el dial respectivo se anota el valor máximo de carga registrado en la máquina de ensayo o, si es el caso, la lectura de deformación del dial indicador, la cual se convierte a carga, multiplicándola por la constante del anillo.

El valor total en Newtons (kgf) que se necesite para producir la falla de la muestra se registrará como su valor de estabilidad Marshall. (Insituto nacional de vias INVIAS, 2013)

3.4. ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (SECO)

Se realiza el ensayo de tracción indirecta con el fin de evaluar la resistencia a la tensión de los diferentes materiales evaluados a 25°C por motivo del alcance del proyecto. La realización del ensayo se evidencia en la Figura 6.



Figura 6 Ejecución del ensayo de resistencia a la tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo que permite imitar la respuesta de un pavimento y obtener la carga máxima que soporta una mezcla antes de romper.

El ensayo de tracción indirecta simula el estado de tensión en la posición más baja de la capa de mezclas asfálticas, esto lo convierte en una herramienta interesante para utilizarla como un ensayo en el estudio de las mezclas bituminosas, con el valor añadido que es un ensayo simple y práctico y los resultados de la prueba no se ven afectados por las condiciones superficiales de la probeta.

Se coloca un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas, en el plano diametral vertical, se aplica una carga del diametral a una rata de deformación 50 mm/min (2"/ min) hasta que se alcance la carga máxima y se registra, se continúa cargando hasta fracturar el espécimen, una vez desmontado el aparato se abre y se estima visualmente el

daño causado por la humedad Se inspeccionan todas las superficies, inclusive las caras falladas, para buscar evidencia de agregado resquebrajado o roto que pueda influenciar los resultados de la prueba y se registran las observaciones.

Se calcula la resistencia a la tensión como sigue: $R_t = (2000 \cdot P / TT \cdot t \cdot D)$ [kPa]

Dónde:

R_t = resistencia a la tensión, kPa (psi)

TT = constante pi.

P = máxima carga, N (lbf)

t = altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba, mm (pulgadas.)

D = diámetro del espécimen, mm (pulgadas).

(Instituto nacional de vías INVIAS, 2013)

3.5. ENSAYO CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE

Se realiza el ensayo de cántabro de las probetas con los diferentes materiales analizados con el fin de determinar el valor de la pérdida de masa por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la máquina de Los ángeles, el procedimiento se puede emplear tanto en el proyecto de mezclas en laboratorio, como para el control en obra de las mismas, el procedimiento se aplica a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo sea inferior a 25 mm.



Figura 7 Ensayo Cántabro (a) Máquina de los ángeles, (b) Masa inicial, (c) Masa final.

El ensayo permite valorar directamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originada por el tráfico en general, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15° y 30° C, con una tolerancia máxima de $\pm 1^\circ$ C.

Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g y se anota este valor como P1. Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo un mínimo de seis (6) horas.

Se introduce a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

Al final del ensayo, se saca la probeta y se determina de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g, anotando este valor como P2.

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = (P1 - P2 / P1) * 100$$

Donde:

P = valor de la pérdida por desgaste, en %.

P1 = masa inicial de la probeta, en gramos.

P2 = masa final de la probeta, en gramos.

(Instituto nacional de vías INVIAS, 2013)



Figura 8 Briquetas sometidas al ensayo

4. RESULTADOS

4.1. ENSAYO MARSHALL

En las Figuras 9, 10 y 11 (Ver enumeración) se presentan los resultados del ensayo Marshall, referentes a la Estabilidad, Flujo y Rigidez Marshall de las tres mezclas de estudio (mezcla de control MDC-19 así como las mezclas con la sustitución del 50% y 100% del llenante mineral por CCA), a partir de los resultados se puede evidenciar que en dichos parámetros poseen mejor respuesta las mezclas asfálticas ante la presencia de ceniza, esto nos dice que las mezclas modificación presenta mayores esfuerzos de cohesión, así mismo los mejores resultados en la mezclas modificadas se les atribuye también una disminución del volumen de vacíos que presentan las mezclas modificadas al ser la ceniza un material con menor tamaño de partículas como tal, obteniendo cuerpos de prueba más rígidos que presentan una mejor resistencia ante las cargas de tránsito. De esta forma, se puede analizar que la CCA ciertamente origina características puzolanas en la mezcla asfáltica, posiblemente por la composición química de la misma.

4.1.1. RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO MARSHALL (ESTABILIDAD)

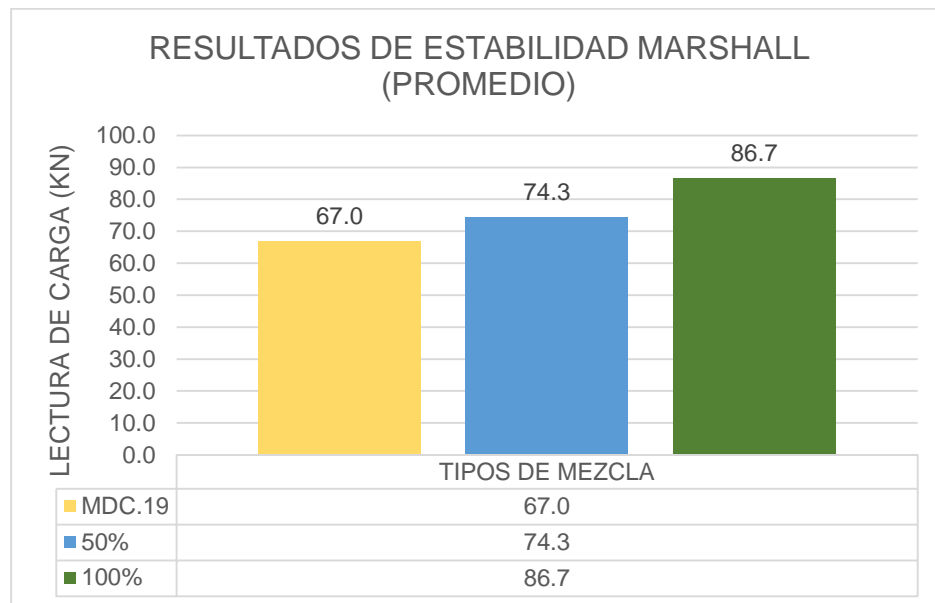


Figura 9 Resultados ensayo Marshall (estabilidad promedio)

“La estabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos ondulaciones y otras que indican cambios en la mezcla.” (Blanco Gallo & Montañez Nieto, 2016)

En la Figura 9 se puede apreciar que la mezcla asfáltica que presenta un porcentaje de llenante mineral de 100% modificado con ceniza de cascarilla se obtiene mayor valor de estabilidad.

4.1.2 RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO MARSHALL (FLUJO)

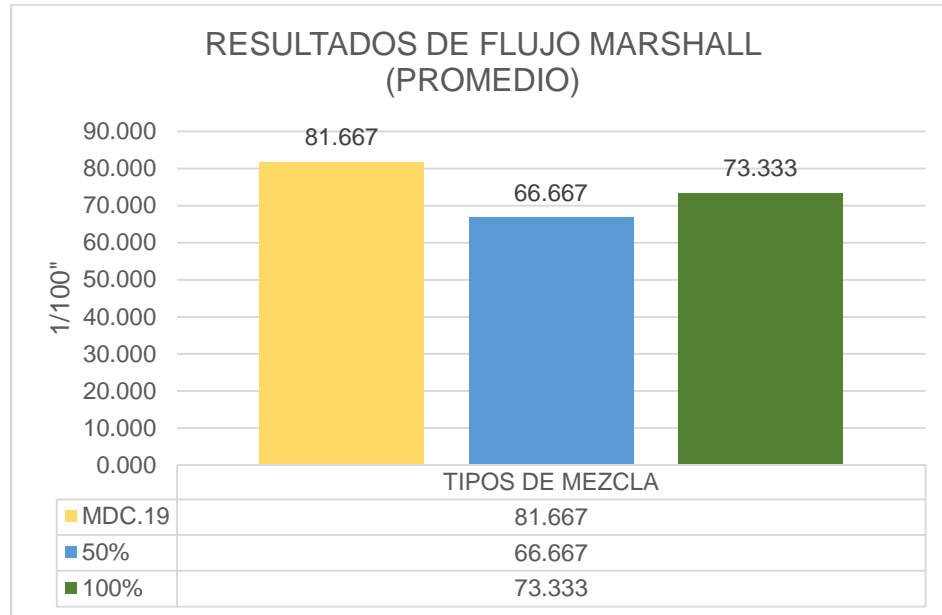


Figura 10 Resultados promedio ensayo Marshall (flujo)

Mediante el método Marshall se puede establecer los valores de flujo propiamente medido en centésima de pulgada, lo cual representa la deformación radial de la briqueta. Indicada por el diferencial en el diámetro vertical de briqueta.

Las mezclas que contienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son consideradas d frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Por otra parte, altos valores de fluencia tienden deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito, en este sentido en la Figura 19 se evidencia que la mezcla asfáltica cuyo porcentaje de llenante mineral corresponde al 50% de ceniza de cascarilla de arroz presenta los menores valores dando a entender que este tipo de mezcla presenta menor fluencia, comparado con las otras mezclas.

4.1.2. PARAMETRO DE RIGIDEZ MARSHALL (E/F)

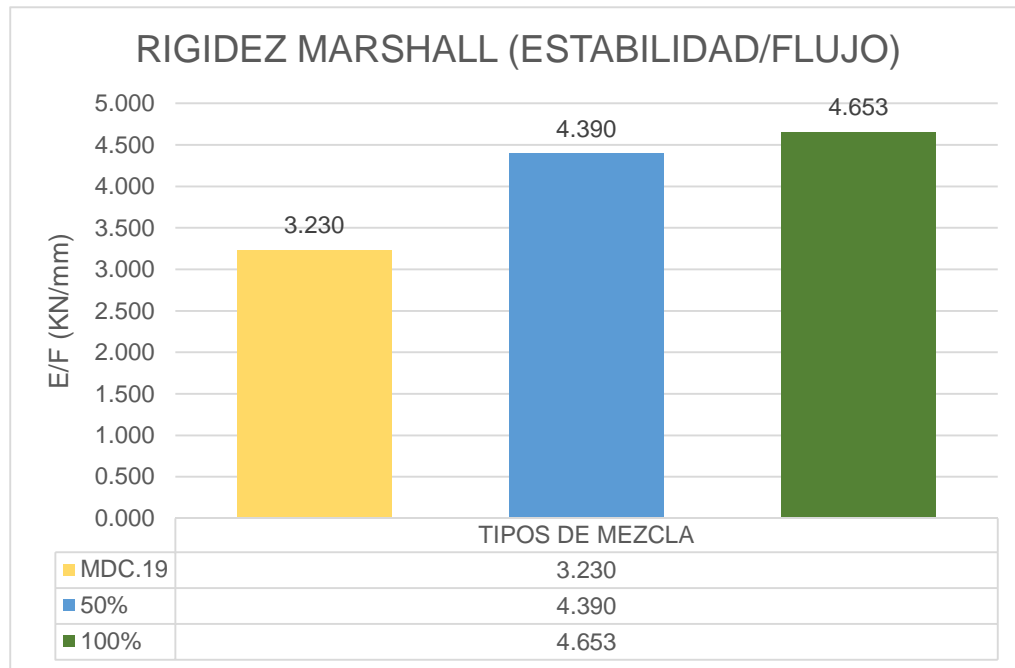


Figura 11 Resultados de rigidez Marshall

En la Figura 15 se evidencian los valores resultantes del parámetro de rigidez Marshall (estabilidad / flujo) de las mezclas asfálticas analizadas, “esta característica se entiende como la resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas” (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2012), dicho parámetro presenta un mejor comportamiento en la mezcla modificada con el 100% de llenante mineral con ceniza de cascarilla de arroz.

4.2. ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA EN SECO.

En la Figura 12 (Ver enumeración) se presentan los resultados de la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) para las tres mezclas de estudio (mezcla de control, mezcla con 50% y 100% de sustitución del llenante mineral por CCA).

Los valores reportados corresponden al valor promedio de tres briquetas realizadas. A partir de los resultados, se evidencia que la mezcla asfáltica con 100% de CCA presentó mayor RTI en referencia a la mezcla de control. Ese comportamiento también es coherente con el Ensayo Marshall esto se debe igualmente al tamaño de partícula menor que posee la ceniza presentando un menor volumen de vacíos en la mezclas modificadas con dicho material, los resultados del presente ensayo también nos presenta un indicativo de mayor adhesión entre las partículas, por lo tanto se evidencia un aumento del 12% de la resistencia a la tensión, adicionalmente otra característica a la cual se le atribuyen la mejoría en los resultados es el contenido de sílice presente en la ceniza de la cascarilla también dicho elemento posee una mayor resistencia al calor que repercute en el incremento de su durabilidad.

4.2.1. RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA

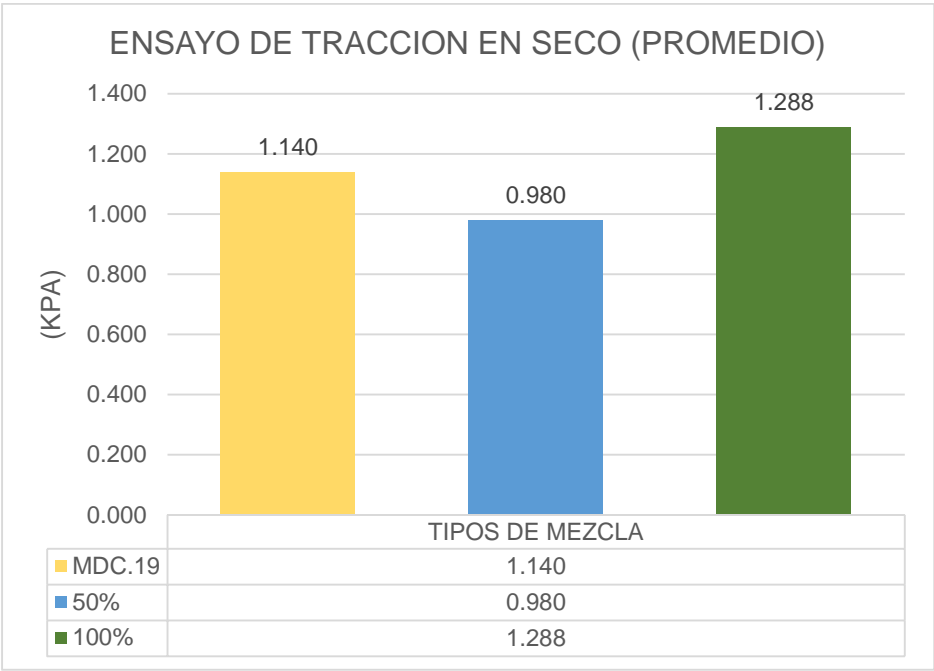


Figura 12 Resultados promedio ensayo de tracción indirecta

En la Figura 12 se muestra que la mezcla que posee mayor resistencia a la falla por esfuerzos de tensión corresponde a la mezcla asfáltica configurada con el 100% de sustitución del llenante mineral con CCA.

4.3. ENSAYO DE CANTABRO PERDIDA POR DESGASTE

En la Figura 13 (ver enumeración) se observan los resultados promedio del ensayo de cántabro de tres cuerpos de prueba para cada tipo de mezcla estudiada, en este ensayo se evidencia la continuidad de mejores parámetros reportados por parte de la mezclas modificadas con CCA. Siendo que el parámetro físico mecánico que se evalúa en el ensayo es la resistencia a la disgregación de las partículas, los mejores resultados correspondientes a las mezclas modificadas son responsabilidad del menor volumen de vacíos que se presentan en dichas mezclas generando así mayores esfuerzos de trabazón entre las partículas y permitiendo mayor penetración del betún. Finalmente y como lo expresan los resultados de los ensayos anteriores se presentan mayores esfuerzos de cohesión y adhesión lo que repercute también en la disminución de la pérdida de más del 40% en los casos de las mezclas modificadas con CCA al 50% y al 100%.

4.3.4 RESULTADOS PROMEDIO ENSAYO DE CANTABRO

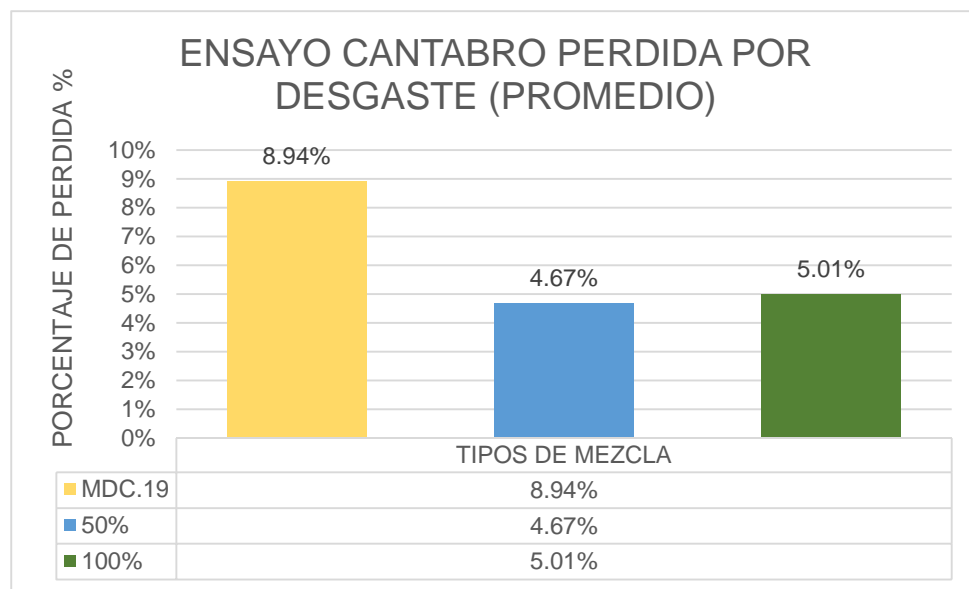


Figura 13 Resultados promedio ensayo cántabro

Mediante el ensayo se obtiene un índice numérico de la pérdida de masa existente, como consecuencia de los golpes a los que son sometidos en la máquina de los ángeles.

En la Figura 13 se pueden comparar los resultados del ensayo de cántabro de la misma se deduce que las magnitudes de pérdida de masa son menores en la mezcla modificada con el 50% de agregado fino de ceniza de cascarilla de arroz.

5. ANALISIS ECONOMICO

En el presente apartado se exponen los costos de los tipos de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de cascarilla estudiadas en el presente Proyecto.

Teniendo en cuenta los tres (3) tipos de mezcla evaluados en el actual trabajo: Mezcla densa en caliente MDC-19, Mezcla densa en caliente con el 50% de llenante mineral de ceniza de cascarilla de arroz y mezcla densa en caliente con el 100% de llenante mineral de ceniza de cascarilla de arroz, en la Tabla 2 se expone la composición de bitumen, agregado mineral y ceniza de cascarilla para cada tipo de mezcla.

TIPO DE MEZCLA	Bitumen	Agregado Mineral	Cascarilla
Mezcla tipo 1 MDC-19	5.5%	94.50%	0%
Mezcla tipo 2 50% Filler de Ceniza	5.5%	91.50%	3%
Mezcla tipo 3 100% Filler de Ceniza	5.5%	88.50%	6%

Tabla 2 Configuración porcentaje de agregados de mezclas estudiadas

Teniendo en cuenta la configuración de cada mezcla asfáltica, en la Tabla 3 se observa el costo de la materia prima en las presentaciones encontradas en el Mercado y el valor unitario de cada una de estas. (Para el caso del bitumen el costo de cada cm³ es relacionado con la densidad del cemento asfáltico 1.05g/cm³ para poder obtener el costo unitario de por gramo).

MATERIAL	UNIDAD	COSTO	VALOR UNITARIO (g)
Bitumen	Galón	\$ 45,000.00	\$ 12.48
Agregado mineral	Bulto 40 kg	\$ 20,000.00	\$ 0.50
cascarilla	Tonelada	\$ 120,000.00	\$ 0.12

Tabla 3 Costos unitarios de la materia prima

Es válido aclarar que para el cálculo del costo de cada tipo de mezcla por tonelada solo se tuvieron en cuenta los costos directos de las materias primas necesarias para la elaboración de cada una de las mezclas.

5.1. COSTOS MEZCLA TIPO 1 MDC-19

De esta forma se tiene que para la mezcla tipo 1 MDC-19, la fracción de agregado mineral para este tipo de mezcla corresponde al 94.5% de la masa de la probeta siendo así, se presenta en la Tabla 4 la relación del costo unitario de cada materia prima con la cantidad necesaria para cada cuerpo de prueba.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
Peso Briqueta (g)	1192.4	1193.9	1191.3	1188.5	1190	1188	1184.3	1188.6	1187.2
Costo Bitumen 5.5%	\$ 819	\$ 820	\$ 818	\$ 816	\$ 817	\$ 816	\$ 813	\$ 816	\$ 815
Costo Agregado Mineral	\$ 563	\$ 564	\$ 563	\$ 562	\$ 562	\$ 561	\$ 560	\$ 562	\$ 561
Costo Total por Muestra	\$ 1,382	\$ 1,384	\$ 1,381	\$ 1,377	\$ 1,379	\$ 1,377	\$ 1,373	\$ 1,378	\$ 1,376
Peso Promedio (g)	1189.4								
Costo Promedio	\$ 1,378								
Costo por Tonelada	\$ 1,159,017								

Tabla 4 Costos tipo de mezcla 1 (MDC-19)

5.2. COSTOS MEZCLA TIPO 2 LLENANTE MINERAL MODIFICADO 50%

En el caso de la mezcla tipo 2 la fracción de agregado mineral corresponde al 91.5% de la masa de la mezcla, adicionalmente se tiene que el 3% de la masa corresponde a ceniza de cascarilla (para el cálculo del costo de la cascarilla es necesario incluir la perdida de la masa provocado por la combustión del material que posee una tasa de reducción de masa de 1/10.5)

Muestra	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tipo de Mezcla	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Peso Briqueta (g)	1191.6	1192.9	1189.9	1188.6	1193.7	1194.7	1193.9	1190	1188.1
Costo Bitumen 5.5%	\$ 818	\$ 819	\$ 817	\$ 816	\$ 819	\$ 820	\$ 820	\$ 817	\$ 816
Costo Agregado Mineral	\$ 545	\$ 546	\$ 544	\$ 544	\$ 546	\$ 547	\$ 546	\$ 544	\$ 544
Costo Ceniza	\$ 45.0	\$ 45.1	\$ 45.0	\$ 44.9	\$ 45.1	\$ 45.2	\$ 45.1	\$ 45.0	\$ 44.9
Costo Total por Muestra	\$ 1,408	\$ 1,410	\$ 1,406	\$ 1,405	\$ 1,411	\$ 1,412	\$ 1,411	\$ 1,406	\$ 1,404
Peso Promedio (g)	1191.49								
Costo Promedio	\$ 1,408								
Costo por Tonelada	\$ 1,181,817								

Tabla 5 Costos tipo de mezcla modificada al 50%

5.3. COSTOS MEZCLA TIPO 3 LLENANTE MINERAL MODIFICADO 100%

En la imagen presentada a continuación se observan los costos de la mezcla tipo 3 la cual corresponde a una mezcla densa en caliente con el 100% de modificación del llenante mineral con ceniza de cascarilla, en este caso se tiene que el agregado mineral representa un 88.5% de la masa de la mezcla, así mismo la ceniza de la cascarilla corresponde a una fracción del 6% de la masa (para el cálculo del costo de la cascarilla es necesario incluir la disminución de la masa provocado por la combustión del material que posee una tasa de reducción de masa de 1/10.5).

Muestra	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Tipo de Mezcla	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Peso Briqueta (g)	1190	1191.9	1192.3	1190.7	1191.5	1192.3	1194.6	1191.3	1192.9
Costo Bitumen 5.5%	\$ 817	\$ 818	\$ 819	\$ 817	\$ 818	\$ 819	\$ 820	\$ 818	\$ 819
Costo Agregado Mineral	\$ 527	\$ 527	\$ 528	\$ 527	\$ 527	\$ 528	\$ 529	\$ 527	\$ 528
Costo Ceniza	\$ 90.0	\$ 90.1	\$ 90.1	\$ 90.0	\$ 90.1	\$ 90.1	\$ 90.3	\$ 90.1	\$ 90.2
Costo Total por Muestra	\$ 1,433	\$ 1,436	\$ 1,436	\$ 1,434	\$ 1,435	\$ 1,436	\$ 1,439	\$ 1,435	\$ 1,437
Peso Promedio (g)	1191.94								
Costo Promedio	\$ 1,436								
Costo por Tonelada	\$ 1,204,617								

Tabla 6 Costos tipo de mezcla modificada al 100%

6. CONCLUSIONES

-) A partir de los resultados obtenido del ensayo Marshall, se pudo evidenciar que los mejores resultados de los parámetros de estabilidad, flujo y rigidez es ocasionado a que las mezclas modificadas presentan mayores esfuerzos de cohesión, así mismo los mejores resultados obtenidos en la mezclas modificadas se les atribuye también una disminución del volumen de vacíos que presentan las mezclas modificadas al ser la ceniza un material con menor tamaño de partículas como tal, obteniendo cuerpos de prueba más rígidos que presentan una mejor resistencia ante las cargas de tránsito. De esta forma también se concluye que la CCA ciertamente origina características puzolanas en la mezcla asfáltica, posiblemente por la composición química de la misma.
-) El comportamiento de las mezclas modificadas en el ensayo de resistencia a la tracción también es coherente con el ensayo Marshall esto se debe de igual manera al tamaño de partícula menor que posee la ceniza presentando un menor volumen de vacíos en la mezclas modificadas con dicho material, los resultados del ensayo mencionado también nos presenta un indicativo de mayor adhesión entre las partículas, por lo tanto se evidencia un aumento del 12% de la resistencia a la tensión, adicionalmente otra característica a la cual se le atribuyen la mejoría en los resultados es el contenido de sílice presente en la CCA, también dicho elemento posee una mayor resistencia al calor que repercute en el incremento de su durabilidad.
-) Siendo que el parámetro físico mecánico que se evalúa en el ensayo de cántabro es la resistencia a la disgregación de las partículas, los mejores resultados correspondientes a las mezclas modificadas son responsabilidad del menor volumen de vacíos que se presentan en dichas mezclas generando así mayores esfuerzos de trabazón entre las partículas y permitiendo mayor penetración del betún, que finalmente repercute en una disminución de la pérdida de masa en más del 40% con respecto a la mezcla de control.

En la Tabla 7 (ver enumeración) se muestran las mezclas que obtuvieron mejores resultados en cada ensayo realizado.

ENSAYO	Mezcla tipo 1 (MDC-19)	Mezcla tipo 2 (50%CCA)	Mezcla tipo 3 (100% CCA)
Estabilidad Marshall			X
Flujo Marshall		X	
Indice de rigidez Marshall			X
Resistencia a la tensión			X
Cantabro		X	

Tabla 7 Conclusión de resultados

1. ANEXOS


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia <small>Vigilada Mineducación</small>		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020									
ENSAYO MARSHALL (INV. R-748-13) CONCRETO ASFÁLTICO											
PROYECTO		COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ									
TEMPERTURA DE MEZCLA		150°C									
TEMPERTURA DE COMPACTACIÓN		135° - 140°									
No. DE GOLPES POR CAPA		75									
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS		CONCRESCOL						Gs. A PETREOS		2,53F 2,54 G	
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO		60 - 70						Gs. ASFALTO		1.012	
Briqueta No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla		MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC50%
% Asfalto		5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%
Altura Briqueta (cm)		6.41	6.40	6.48	6.32	6.32	6.39	6.42	6.35	6.38	6.4
Paso briqueta en aire Seca (g)		1192.4	1193.9	1191.3	1188.5	1190	1188	1184.3	1188.6	1187.2	1191.6
Peso briqueta en aire SSS (g)		1192.6	1194.4	1192	1189.5	1190.1	1183.5	1184.5	1188.8	1188.2	1191.7
Peso briqueta en agua (g)		675.9	681.7	675.2	677.8	676.7	675.8	670.8	675.1	647.0	674.1
Lectura de carga (KN)					68	67	66				
Flujo (1/100")					85	85	75				
Estabilidad (lb)					3066.8	3021.7	2976.6				
OBSERVACIONES											

Figura 14 Resultados obtenidos del ensayo Marshall mezcla tipo MDC-19


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia Vigilada Mineducación		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020									
ENSAYO MARSHALL (INV. R-748-13) CONCRETO ASFÁLTICO											
PROYECTO		COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ									
TEMPERTURA DE MEZCLA	150°C										
TEMPERTURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°										
No. DE GOLPES POR CAPA	75										
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL							Gs.A.PETREOS	2,53	- 2,54	
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60 - 70							Gs. ASFALTO	1.012		
Briqueta No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Tipo de Mezcla	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD50%	MOD100%	MOD100%	
% Asfalto	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	
Altura Briqueta (cm)	6.37	6.41	6.42	6.40	6.41	6.43	6.41	6.42	6.48	6.4	
Paso briqueta en aire Seca (g)	1192.9	1189.9	1188.6	1193.7	1194.7	1193.9	1190	1188.1	1190	1191.9	
Peso briqueta en aire SSS (g)	1193	1190.3	1189.1	1194.0	1195.0	1194.1	1190.3	1188.4	1190.2	1192.5	
Peso briqueta en agua (g)	677.5	670.7	671.5	674.6	679.0	675.1	670.7	673.4	669.6	672.5	
Lectura de carga (KN)			76	71	76						
Flujo (1/100")			69	64	67						
Estabilidad (lb)			3427.6	3202.1	3427.6						
OBSERVACIONES											

Figura 15 Resultados ensayo Marshall mezcla modificada al 50%


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia Vigilado Mineducación		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020									
ENSAYO MARSHALL (INV. R-748-13) CONCRETO ASFÁLTICO											
PROYECTO		COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ									
TEMPERTURA DE MEZCLA		150°C									
TEMPERTURA DE COMPACTACIÓN		135° - 140°									
No. DE GOLPES POR CAPA		75									
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS		CONCRESCOL					Gs.A.PETREOS		2,53 - 2,54		
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO		60 - 70					Gs. ASFALTO		1.012		
Briqueta No.		21	22	23	24	25	26	27			
Tipo de Mezcla		MOD100%	MOD100%	MOD100%	MOD100%	MOD100%	MOD100%	MOD100%			
% Asfalto		5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%			
Altura Briqueta (cm)		6.39	6.42	6.39	6.41	6.48	6.44	6.46			
Paso briqueta en aire Seca (g)		1192.3	1190.7	1191.5	1192.3	1194.6	1191.3	1192.9			
Peso briqueta en aire SSS (g)		1192.6	1191.1	1191.9	1192.7	1194.9	1191.9	1193.2			
Peso briqueta en agua (g)		675.2	671.5	674.2	674.0	672.5	674.5	674.6			
Lectura de carga (KN)			86	89	85						
Flujo (1/100")			70	78	72						
Estabilidad (lb)			3878.6	4013.9	3833.5						
OBSERVACIONES											

Figura 16 Resultados ensayo Marshall mezcla modificada al 100%

TOMA DE DATOS RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD <small>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO INV-E-725-13</small>

ORDEN: Mezcla modificada con ceniza de cascarilla	Fecha de ensayo: 12 - 09- 2019
EQUIPO UTILIZADO	
Prensa Marshall: <input checked="" type="checkbox"/>	Termómetro: <input checked="" type="checkbox"/>
Balanza: <input checked="" type="checkbox"/>	Pie de Rey: <input checked="" type="checkbox"/>

1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA

1.1 CONDICIÓN DE LOS ESPECÍMENES GRUPO SECO

BRIGUETA No.	LECTURA DE CARGA
1	11.49 KN (0%)
2	11.78 KN (0%)
3	10.94 KN (0%)
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	9.79 KN (50%)
11	9.48 KN (50%)
12	10.12 KN (50%)
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	12.36 KN (100%)
20	12.50 KN (100%)
21	13.80 KN (100%)

OBSERVACIONES

Figura 17 Resultados ensayo de tracción indirecta

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia <small>Vigilada Mineducación</small>		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020				
CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE						
INFORME DE ENSAYO		PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E760-13				
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ</p> <p> PROYECTO: _____ </p> <p> Fecha de Ensayo: 02/10/2019 Fecha Recepción: _____ </p> </div>						
I. DATOS DEL ENSAYO						
	Referencia	0%	0%	0%		
	Muestra	7	8	9		
	Condición de la muestra	SECA	SECA	SECA		
	Descripción	-	-	-		
	Masa muestra inicial (g)	1.185	1.189	1.188		
	Masa muestra final (g)	1,077,9	1,066,8	1,078,6		
	Pérdida (g)	107.1	102.2	109.4		
	Porcentaje de pérdida %	9.03%	8.59	9.2		
OBSERVACIONES: 300 REVOLUCIONES 0% CENIZA						

Figura 18 Resultados de ensayo cántabro mezcla tipo MDC-19


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia <small>Vigilada Mineducación</small>		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020	
CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR			
INFORME DE ENSAYO		PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E760-13	
COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ			
PROYECTO		FECHA DE RECEPCIÓN	
Fecha de Ensayo 02/10/2019		Fecha Recepción	
I. DATOS DEL ENSAYO			
Referencia	50%	50%	50%
Muestra	16	17	18
Condición de la muestra	SECA	SECA	SECA
Descripción	NORMAL	NORMAL	NORMAL
Masa muestra inicial (g)	1195.0	1190.8	1189.1
Masa muestra final (g)	1137.9	1136.2	1132.8
Pérdida (g)	57.1	53.8	56.3
Porcentaje de pérdida %	4.77%	4.51	4.73
OBSERVACIONES: 300 REVOLUCIONES 50% CENIZA			

Figura 19 Resultados de ensayo cántabro mezcla modificada al 50%

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia <small>Vigilada Mineducación</small>		LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL 2020	
CARACTERIZACION DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR			
INFORME DE ENSAYO		PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E/60-13	
COMPORTAMIENTO MECANICO DE MEZCLA MODIFICADA CON CENIZA DE CASCARILLA DE			
PROYECTO		ARROZ	
Fecha de Ensayo		Fecha Recepción	
02/10/2019			
I. DATOS DEL ENSAYO			
Referencia	100%	100%	100%
Muestra	25	26	27
Condición de la muestra	SECA	SECA	SECA
Descripción	NORMAL	NORMAL	NORMAL
Masa muestra inicial (g)	1195.4	1192.1	1193.7
Masa muestra final (g)	1133.1	1137.5	1131.1
Pérdida (g)	62.3	54.6	62.6
Porcentaje de pérdida %	5.21%	4.58	5.24
OBSERVACIONES: 300 REVOLUCIONES 100% CENIZA			

Figura 20 Resultados de ensayo cántabro mezcla modificada al 100%

2. BIBLIOGRAFIA

- Alvarez Garcia, L., & Ardila Perez, A. (2011). *La cascarilla de arroz como material de agregado en la produccion de prefabricados de mortero seco utilizados en el aligeramiento de losas de concreto*. Bogota: Universidad Piloto de Colombia. Obtenido de <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000178.pdf>
- Angladette, A. (1969). *El arroz*. Barcelona, España.: Editorial Blume .
- Bastidas Martinez, J. G., Rondón Quintana, H., & Zafra Mejía, C. (Octubre de 2019). *Study of hot mix asphalt containing recycled concrete aggregates that were mechanically treated with a los angeles machine* (Vol. 10). Artículo ID:IJICET_10_10_024: International journal of civil engineering. Obtenido de International journal of civil engineering and technology: [/www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=10](http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=10)
- Bejarano Lopez, J. F., & Caicedo Garcia, C. (2017). *Analisis del comportamiento fisico-mecanico de la mezcla asfaltica tipo MDC-19 con fibra natural de caña de azucar*. Bogota: Universidad Catolica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14529/1/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf>
- Blanco Gallo, F. L., & Montañez Nieto, J. J. (2016). *Analisis del comportamiento fisico en mezclas asfalticas MDC-19 modificado con sodio y glucosa*. Bogotá: Universidad Catolica de Colombia.
- Calderon Saenz , F. (2002). *La cascarilla de arroz "caolinizada" una alternativa para mejorar la retencion de humedad como sustrato para cultivos*. Bogota: Drcalderonlabs. Obtenido de http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Cascarilla_Caolinizada/La_Cascarilla_Caolinizada.htm
- Camapum de Carvalho, J., Bastidas Martinez, J. G., Lucena, L. C., Farias, M. M., & Rondón Quintana, H. A. (2020). *Preliminary study of hot mix asphalt containing water treatment and sewage sludge* (Vol. LXVI). Warsaw University of technology, faculty of civil engineering. doi:1024425/ace.2020.131785
- Cardenas, A., & Garzon, E. (2013). *Variacion de temperatura de los componente de una mezlca densa en caliente tipo 3 con cemento asfaltico 80-100*. Bogota: Universidad Catolica de Colombia. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/914/2/Variaci%C3%B3n-temperatura-componentes-MDC_tipo-3-cemento%20asf%C3%A1ltico_80-100.pdf
- Castillo Alvarez, A., Delgado Salgado, R., Garcia Hernandez, E., Dominguez , M., Baeza Granados, J., Cruz Aguirre, A., . . . Martinez Mendoza, A. (2012). Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulosicos. *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 11. Obtenido de <http://www.ehu.eus/reviberp/reviberp/SEPT12/alvarez.pdf>

- Claveria, P., Triana, D., & Varon, Y. (2018). *Caracterizacion del comportamiento geotecnico de los suelos de origen volcanico estabilizado con ceniza de arroz y bagazo de caña como material para subrasante*. Ibagué: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/6314/1/2018_caracterizacion_comportamiento_geotecnico.pdf
- DNP. (3 de 11 de 2011). *Colombia compra eficiente*. (Departamento Nacional de Planeación) Recuperado el 26 de 1 de 2018, de <https://www.colombiacompra.gov.co/colombia-compra/colombia-compra-eficiente/mision>
- Echandi, O. (1975). *Alimentacion del ganado con raciones a base de cascarilla de arroz, bagazo de caña o pulpa de café comparadas con pastoreo libre en verano*. San José: Universidad de Costa Rica.
- ESCOBAR, F. Á. (2007). *CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO*. TUNJA: UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.
- Fedearroz. (2018). Arroz. *REVISTA DEL ARROZ*, 3.
- Gloria, M. (s.f.). *Generalidades del asfalto*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/405079505/Generalidades-del-asfalto>
- Gomez Doncel, E., & Chicue Lozano, X. (2015). *Incidencia de la Harina de arroz en una mezcla asfáltica MDC-2*. Girardot: Universidad Piloto de Colombia. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5606/tesis%20impriMIR%20%28FINAL%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gorbea, A. A. (2004). *Levantamiento Arquitectónico*. Granada, España.
- Instituto nacional de vías INVIAS. (2013). *Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. En *Normas de ensayos y materiales 2013*. Bogotá: Consorcio Normas 2012.
- Mattey, P., Robayo, R., Díaz, J., Delvasto, S., & Monzo, J. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 10. Obtenido de <http://ve.scielo.org/pdf/rlmm/v35n2/art15.pdf>
- MAYA, J. G. (marzo de 2014). *fluidos.eia*. Obtenido de <http://fluidos.eia.edu.co/suministroydisposiciondeaguas/temasdeinteres/anclajes/anclaje stuberias.htm>
- MORALES, A. R. (2015). *SLIDESHARE*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/AndresGarcia271/cal-como-mejorador-de-adherencia-en-mezclas-asfalticas>
- MORALES, A. R. (2015). *Uso de cal como mejorador de adherencia en mezclas asfálticas*. Bogotá: universidad militar Nueva Granada.
- Osorio Ortiz, A., Palma Huertas, E., & Rivera Bermudez, L. (2009). *Incidencia de la ceniza de cascarilla de arroz en el asfalto para una mezcla asfáltica MDC-2*. Universidad Piloto De Colombia. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5738>

- Parra Bechara, M., & Gallo Ortiz, J. (2018). *Evaluacion del comportamiento del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz*. Ibagué: Universidad De Ibagué. Obtenido de <https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/593/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>
- Pedraza Diaz, E., & Forigua Orjuela, J. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2575/1/Dise%C3%B1o-mezclas-asf%C3%A1lticas-modificadas-adici%C3%B3n-desperdicios-pl%C3%A1sticos.pdf>
- Pinzon, S. (2018). Asfalto modificado con cascarilla de arroz. *Universidad Piloto De Colombia Seccional Del Alto Magdalena*, 1. Obtenido de <https://girardot.unipiloto.edu.co/asfalto-modificado-con-cascarrilla-de-arroz/#>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista de Ingeniería universidad de Los Andes*, 9.
- Ruge Cardenas, J. C., Rondón Quintana, H. A., & Bastidas Martinez, J. G. (2019). *Evaluation of hot-mix asphalt containing portland cement treated blast furnace slag* (Vol. LXV). Sciencedirect archives of civil engineering. doi:10.2478/ace-2019-0028
- Salas Camacho, P., & Guzmán Alfaro, W. (2014). *Pista de prueba con asfalto modificado con ceniza de cascarilla de arroz en una vía con tráfico pesado*. Universidad Piloto De Colombia. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5618>
- Salas, A., Delvasto, S., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Producción de concretos de alto desempeño mediante la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz de alta reactividad. *Universidad Nacional de Colombia*, 7. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/73170/39517-175847-2-PB.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- SARA BEATRIZ AGUILAR BONILLA, EMMANUEL ALEXANDER HERNÁNDEZ MALDONADO, YENCI RAQUEL SIBRIAN HERNÁNDEZ. (2016). *DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON CAL HIDRATADA*. SAN SALVADOR: UNIVERSIDAD EL SALVADOR.
- Suárez Tirado, A. (2019). *Análisis monótono de mezclas densas en caliente con asfalto modificado con 50% de caucho y 50% de cuero*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23893/1/TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- UMSS. (2010). *Manual completo de diseño de pavimentos*. Facultad de ciencia y tecnología.
- Vásquez Piñeros, M., & Becerra León, L. (2016). La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero. *Universidad Libre de Colombia*, 10. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9848?locale-attribute=en>